

国際宇宙ステーション搭載 CALET ガンマ線バーストモニター 開発における硬 X 線モニターの分解能の改善

寺澤 俊介 (青山大学大学院 理工学研究科)

Abstract

2014 年の打ち上げ予定、現在開発中の宇宙線観測装置 CALorimetric Electron Telescope(CALET) は国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟「きぼう」に設置され、5 年間の観測を予定している。CALET には青山学院大学吉田研究室が中心となり開発中である CALET ガンマ線バーストモニター (CGBM) の搭載が決定している。CGBM は宇宙でもっとも明るい爆発現象の 1 つであるガンマ線バーストなどの天体突発現象を、X 線やガンマ線領域で観測する事を目的とする。CGBM は 2 種類のシンチレーション検出器を搭載し、その 1 つである 7 keV -1 MeV で感度のある硬 X 線モニター (HXM) は CALET の最終設計段階において、検出器に使用できる空間容積に限りが生じ、シンチレータに比べ口径の小さい光電子増倍管を使用せざるをえなかった。そのために単一のエネルギー源に対する応答が、本来はシングルピークで見られるものが 2 つに分裂しダブルピークで観測されるという問題が起きた。今回ダブルピークに分裂してしまう原因を追求するためシンチレータ面に対し位置依存性を測定し、応答の変化を測定した。本発表では行った実験の詳細とその結果について述べる。

1 CALET 計画

1.1 CALET 概要

CALET とはカロリメータ型宇宙電子線望遠鏡 (CALorimetric Electron Telescope) の略である。CALET は 2014 年に H-IIB ロケットにより打ち上げられ、H-II Transfer Vehicle (HTV) により国際宇宙ステーション (ISS) に移送され、日本実験モジュール「きぼう」に設置予定である。CALET は 5 年間という長期にわたり継続的に高エネルギー電子やガンマ線などの宇宙線を観測し、宇宙線の生成場所、加速源、最高エネルギーなど宇宙の基本的な性質を明かにし、今日まで明らかにされていない宇宙線の起源の解明を目指している。また、電子・陽電子観測による暗黒物質探査も視野に入れている。CALET は、JAXA、NASA、ASI(イタリア宇宙局)、及び日米伊多数の大学研究所で多くのメンバーにより検出器の開発を進めている国際協力ミッションである。CALET の観測装置は大きく分け、カロリメータ (CAL) とガンマ線バーストモニター (CGBM) の 2 つの検出器により構成されている (図 1)。CAL は早稲田大学が中心となり開発を進めている。この検出器は、電荷検出器

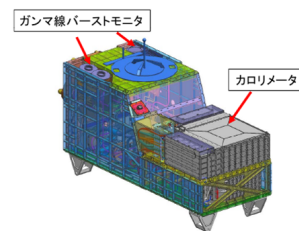


図 1: CALET 概要図。左手前の 2 台が HXM、左奥の 1 台が SGM

(CHD)、飛跡検出型カロリメータ (IMC)、全吸収型カロリメータ (TASC) の 3 種類の機器で構成された高エネルギー宇宙線観測装置で、電子、ガンマ線、陽子、原子核といった GeV から TeV までの高エネルギー粒子、及びガンマ線を観測する。CALET ガンマ線バーストモニター (CALET Gamma-ray Bursts Monitor: CGBM) は CAL でのガンマ線バースト (GRB) 観測を強化するための観測装置であり青山学院大学が中心となって開発を行っている。CAL では 1 GeV から 1000 TeV のエネルギー帯で観測するため、カバーできない低エネルギー側を CGBM で補う。CGBM は検出器として 7 keV から 1 MeV までの感度を持

つ硬 X 線モニター (Hard X-ray Monitor:HXM) を 2 台、100 keV から 20 MeV までの感度を持つ軟ガンマ線モニター (Soft Gamma-ray Monitor:SGM)1 台で構成されている。HXM は、今まで宇宙で使用実績の無い $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータを用いる。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ はシンチレータとしてよく使用される $\text{NaI}(\text{Tl})$ よりも光量が大きく、分解能が非常に優れている。しかし $\text{NaI}(\text{Tl})$ よりも高い潮解性を示す為、ハウジングにより外気から遮断を完璧にする必要がある。また X 線に感度をもたせるために $410\mu\text{m}$ のベリリウム入射窓を使用する。SGM には原子番号が大きいため阻止能に優れ、宇宙での使用実績のある BGO シンチレータを用いる。この 2 つの検出器により CGBM では 7 keV から 20 MeV までのエネルギー範囲で観測を行うことが可能になる。HXM、SGM それぞれの性能を以下に示す (表 1)

表 1: CGBM の性能

CGBM	HXM	SGM
シンチレータ	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	BGO
台数	2	1
エネルギー	~7keV-1MeV	~100keV-20MeV
サイズ	$\Phi 61\text{mm} \times 12.7\text{mm}$	$\Phi 102\text{mm} \times 76\text{mm}$
エネルギー分解能	~3-4% @662keV	~12% @662ke
有効面積	68cm^2 (2 台)	82cm^2
視野	天頂 ~50 度	ほぼ半天

2 実験目的

HXM は最終設計段階において、検出器用に使用できる空間容積が限られてしまい、HXM の台数が 2 台まで減少した。この為 HXM 自体のサイズ上シンチレータのライトガイドより小さいサイズの光電子増倍管 (PMT) を使用しなければならない (図 2)。単色エネルギーのスペクトルをシンチレーション検出器に入射させた際、シンチレータより大きいサイズの PMT を使用時にはシングルピークとしてスペクトルを取得できるのだが、PMT 径が小さいと本来シングルピークで得られるスペクトルが割れ、ダブルピークになる問題が生じた。PMT がシンチレータ径から外れた位置より光が完全に集光できず光が漏れ出したため、シンチレータ面の位置毎で応答がそれぞれ異なる可能性が考えられる。そこで位置依存

性実験を行った。その後取得した位置毎の応答をシミュレーションに取り込み、検出器のエネルギー応答関数の構築を目的とする。

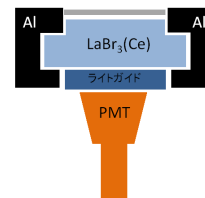


図 2: HXM における結晶と PMT の口径の違い

3 位置依存性実験

第 2 章で検出器全体に単色のガンマ線を照射した際に、本来シングルピークで見られる応答がダブルピークに割れるという、HXM の構造上により発生した問題について提起した。本実験では $\Phi 3\text{mm}$ の穴の開いた鉛ブロックで線源からのガンマ線をコリメートし中心から縁側に向けて間隔を開けて照射し、位置毎にスペクトルデータを取得する。この実験データから位置の違いによる波高値、及びエネルギー分解能の関係を明かにする。

3.1 実験手順

実験に使用したセットアップを以下に示す (図 3)。

- スーパーバイアルカリ PMT (浜松ホトニクス R6232-05)
- D 型ソケットアッセンブリ (浜松ホトニクス E1198-27)
- 3inch $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 結晶 (Be 窓)
- 自作プリアンプ
- 整形アンプ (ORTEC 671) 時定数 $2\mu\text{s}$
- HV (MATSUSADA) 印加電圧:700V
- ディスクリミネータ (シングルチャンネルアナライザ ORTEC 551)
- TIL to NIM (N-TS221 Logic Level Adapter)
- ゲートジェネレータ (N-TM 203 100MHz Clock Generator)
- VME ボード & VME クレー (ADC)

- 線源 ^{137}Cs (662keV)
- 鉛ブロック (100 × 100 × 50mm:穴 Φ 3mm)

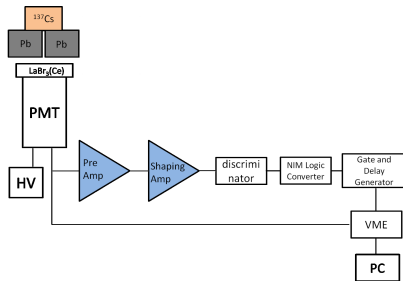


図 3: 実験系のブロック図

3.2 測定位置の決定方法

今回は Φ 3mm の穴の開いた鉛ブロックを使用して線源 ^{137}Cs からのガンマ線をコリメートしシンチレータ面に向け照射した。照射位置は中心から 3mm 間隔で計 13 点測定を行った (図 4)。

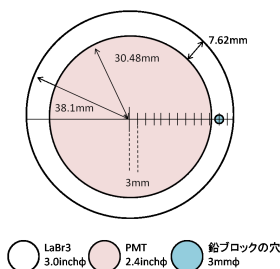


図 4: 測定位置の決定方法

3.3 実験結果

本実験で使用した VME バスを使用した計測システムでのデータ取得方法は、シンチレータの位置毎にそれぞれ 300,000 カウントを 10 回連続測定し、そのデータを足し合わせて位置毎に計 3,000,000 カウントのデータを得た。取得したスペクトルのピークチャンネルと分解能のパラメータをフィッティングし関数として検出器モデルに取り込む。図 5 は位置とピークチャンネル及び分解能のグラフを示したものである。この図より中心から縁側に向けてピーク

チャンネルが下がり、特に 20mm 前後で大きく変動している。同様に分解能も 20mm 前後で大きく変動している。これらの影響で検出器全体に照射した際、シングルピークがダブルピークに割れる事が考えられる。

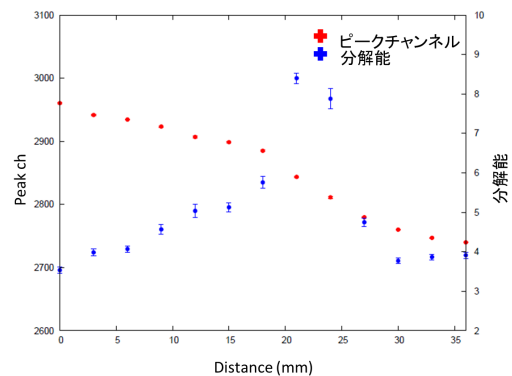


図 5: 位置とピークチャンネルと分解能のグラフ。21mm から 27mm で大きく変動しているのがみられる。

3.4 検出器モデルとの比較

作成した検出器モデルの処理手順を以下に示す。

実験で取得した位置ごとのピークチャンネルと分解能をフィッティングし関数として取り込む

ピークチャンネルと分解能から位置ごとの分散 σ を算出する

Box-Muller 法で正規分布を発生させる
この際に中心からの位置ごとのガウシアンを上記の σ を利用する

それぞれの位置で発生させたガウス関数をシンチレータの円環の面積にかけ足し合わせる

Φ 3mm で取得したデータ (図 5) をピークチャンネル、分解能それぞれでフィッティングを行い、検出器モデルに取り込んだ (図 6)。ピークチャンネルの関数は 18mm 前後で 2 つの関数に分けフィッティングをし

た。変化がいびつだったため、12、21、27mm 前後で 4 つの関数でそれぞれフィッティングを行った。

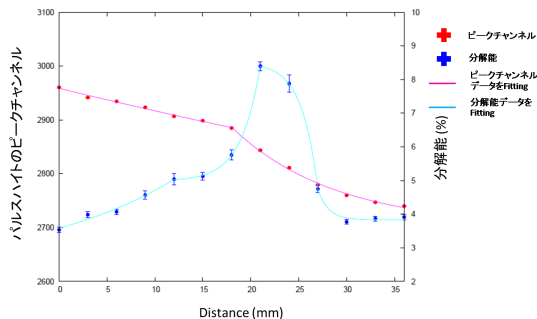


図 6: 図 5 をフィッティングしたグラフ。分解能のデータは変動が細かいために 4 つの関数でフィッティングをしてある。

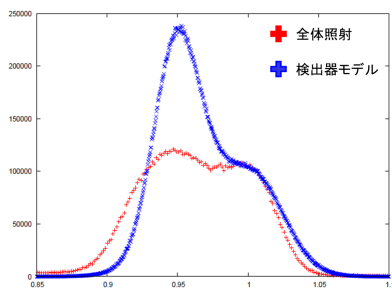


図 7: 全体照射のスペクトルと検出器モデルのスペクトル。ダブルガウスの左側が大きく異なっている。

3.5 考察

図 7 では全体照射のスペクトルと検出器モデルで作成したスペクトルそれぞれのダブルガウスの右側のピークで規格化し比較したものである。右側のピークは全体照射に比べ検出器モデルで作成されたスペクトルの方が分解能が悪く、一方左側は分解能が全体照射に比べ良いままであった。考えられる事として、全体照射のスペクトルを取得時の線源との位置関係が、コリメートしている場合と距離を合わせるためにシンチレータ面より 5cm 離して取得した。ガンマ線は線源を中心として等方的に放射される。その為線源からシンチレータ面中心には垂直状に入射

するが、シンチレータの縁側に向かうにつれ X 線が垂直に入射する確率が下がる。一方検出器モデルの方はすべての位置において、コリメータを使用していることにより放射線が前者に比べ垂直に入射できる。二つのスペクトルを比較する為には、全体照射のデータを取得時に線源を一定距離をあけてシンチレータ面に垂直に入射させる必要がある。以上を考慮すると、全体照射のダブルガウス左側のカウント値が検出器モデルのように増える可能性がある。実験毎のシンチレータと PMT の間の接着剤が一樣でないことを考慮しても実験とシミュレーションの差が開いたので、今回検出器モデルで取り込んだ分解能とピークチャンネルだけでは考慮できない事も考えられる。位置毎の光量が下がっているのはシンチレータの径が PMT からはずれる事だけではなく、PMT の感度が場所に依存しているのであれば PMT 自身の有効面が関係している可能性がある。

4 課題

PMT の有効面に対する感度の違いによって位置ごとに応答が異なる可能性がみられたので、シンチレータ同様に PMT の位置依存性の確認が必要である。また本実験ではシンチレータ面に対して垂直に線源を照射したのみであった。シンチレーション検出器に線源を照射する角度を変える事でどのように応答が変化するか確認するために、角度依存性の必要がある。以上の事から、今後改善策を見出していきたい。

本発表では位置依存性の結果に加え PMT の径から外れた結晶部分に反射材を巻き付けた結果、並びに結晶全面の応答を X 線とガンマ線を使用しシンチレータ全面をスキャンした結果も発表します。

Reference

- [1] 早稲田大学 CALETWeb サイト
<http://www.calet.rise.waseda.ac.jp/>
- [2] NASACALETWeb サイト
<http://calet.phys.lsu.edu/>
- [3] Radiation Detection and Measurement 著者 Glen F.Knoll 発行元 日刊工業新聞社
- [4] 放射線計測の理論と演習上巻 基礎編 著者ニコラス ツルファニディス 発行元 現代工学社